

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Тарыгина Ильи Евгеньевича
на тему: «Расширенные температурные модели погрешностей измерений
инерциальных датчиков в задаче калибровки»
по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин**

Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) является необходимой процедурой при подготовке ее к эксплуатации, позволяющей повысить точность навигационного решения. В силу распределенного положения датчиков в системе наличие свободного объема, а также внешних и внутренних контуров нагрева и охлаждения, вопросы создания математического аппарата, способного использовать сложные температурные модели ошибок датчиков и учитывать их при калибровке, являются актуальными.

Несмотря на большое многообразие методов калибровки и моделей датчиков, сформулированная в работе научная цель, направленная на создание метода калибровки, учитывающего зависимости погрешностей измерений инерциальных датчиков от температуры, скорости изменения температуры и компонент пространственного градиента температуры (далее вариации температуры) и не требующего установления температурного равновесия в системе, является новой и вполне обоснованной. С этих позиций формулируется новая постановка задачи калибровки, которая и успешно решается в работе.

Очевидно, что логика решения общей задачи требует последовательного решения нескольких частных задач, а именно:

1. Разработать математическую модель погрешностей измерений инерциальных датчиков, учитывающую вариации температуры;
2. Исследовать наблюдаемость модели в задаче оценивания погрешностей БИНС (калибровки БИНС);

3. В силу недостаточности квантования уровня температуры датчиками (технологическая проблема) решить задачу оценки производной температуры по времени внутри БИНС;

4. Проверить работоспособность и уточнить методику при калибровке реальных систем различного класса точности.

Перечисленные задачи, решаемые в работе, представляются вполне логичными, обоснованными, а также направлены на достижение единой цели работы. В результате решения поставленных выше задач автор сформулировал следующие **научные положения**, которые и вынесены на защиту:

1. В случае калибровки БИНС вокруг каждой из приборных осей в плоскости горизонта необходимым и достаточным условием наблюдаемости параметров расширенной модели погрешностей инерциальных датчиков является линейная независимость функций температуры, производной температуры по времени и компонент пространственного градиента температуры как функций времени.

Автором правильно проведена оценка наблюдаемости системы на основе ковариационного анализа ошибок оценок компонент вектора состояния по результатам полунатурного численного моделирования, в ходе которого апостериорные значения сигм, составляющих вектора состояния, уменьшились на фоне их априорных значений и заданных уровнях шумов инерциальных датчиков.

Безусловно, данный результат обладает новизной, поскольку расширяет традиционную постановку задачи калибровки, путем введения дополнительных слагаемых, зависящих от вариации температуры.

Практическая значимость результата определяется повышением качества калибровки и, как следствие, точности навигационного решения, которое наиболее существенно для использования в БИНС навигационного класса точности.

Замечания: в разделе 3.1.3 по результатам калибровки реальной системы БИНС-РТ, важными являются также графики СКО оценки параметров вектора состояния (по серии испытаний), которые не приводятся, вместо этого оценка точности работы алгоритма подтверждается результатами корреляционного анализа матрицы ковариации, а также конечными (установившимися) значениями данных параметров.

2. Разработанная методика температурной калибровки БИНС позволяет в разы сократить время, затрачиваемое на проведение калибровочных экспериментов.

Замечания: по моему мнению, данное положение не имеет самостоятельной научной новизны и лишь доказывает полученный практический эффект. Кроме того, в диссертации, оценки сокращения времени калибровки для различных типов навигационных систем не приводятся.

3. Разработанный метод оценки скорости изменения температуры по измерениям термодатчиков позволяет получить оценку производной температуры с необходимой точностью в реальном времени, когда шаг квантования измерений термодатчиков велик, и, как следствие, ошибка измерений принципиально отличается от традиционной модели «белого шума».

В силу технологической невозможности уменьшения шага дискретизации (квантования) показаний термодатчиков при оценке температуры и особенно ее производных сформулирована задача оптимальной оценки скорости изменения температуры, новизна которой определяется использованием экспоненциальной (эмпирической) модели для аппроксимации показаний датчиков температуры с достаточной точностью и фильтра Калмана для ее оценки. Структура модели и количество ее переменных обосновано как с позиций теории теплопроводности, так и с позиций обработки реальных данных, показывающих, что экспоненциальная модель является более точной, особенно на этапах разогрева, и по сравнению с линейной моделью имеет меньшее запаздывание и меньшую ошибку оценки.

Практическая значимость результата определяется возможностью оценки вариации температуры с требуемой высокой точностью.

4. Модификация предложенной методики калибровки БИНС позволяет осуществлять с необходимой точностью температурную калибровку блока ДУС без ньютонметров при наличии измерений калибровочного стенда.

Новизна данного результата заключается в дополнительном оценивании времени рассогласования показаний датчиков БИНС по информации от стенда и исключении из уравнений акселерометров. Наблюдаемость и возможность оценок параметров также производится на основе моделирования и ковариационного анализа. На практике данный результат позволяет калибровать навигационные системы тактического класса точности, например, малогабаритная курсовертикаль на базе твердотельных-волновых гироскопов при использовании эталонной информации поворотных столов.

Диссертация написана грамотным инженерным языком, оформлена методически правильно, содержит большое количество рисунков, графиков и таблиц, присутствуют такие необязательные, но полезные разделы как, обозначения, а также ссылки на список собственных работ по разделам с указанием вклада автора. Судя по публикациям, Тарыгин Илья Евгеньевич профессионально и достаточно продолжительное время занимается проблемой калибровок БИНС, ранние публикации, представленные в работе, датированы 2014 годом, а последние - 2022 годом. География и количество публикаций автора также весьма впечатляющие, работы представлены в журналах, индексируемых в международных базах Web Of Science и Scopus (пять работ), что с большим запасом перекрывает требования руководящих документов. В период исследований, автор также активно участвовал в конференциях (пять публикаций), результаты которых опубликованы в сборниках индексируемых в базе данных Scopus. С этих позиций Тарыгин Илья Евгеньевич сделал многое для общественной открытой публичной научной экспертизы результатов, что, безусловно, является большим плюсом работы.

Указанные при оценке научных положений замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Тарыгин Илья Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент

профессор кафедры «Инженерной кибернетики»

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Садеков Ринат Наилевич

18.03.2024

Контактные данные:

защищена диссертация: 20.01.09 «Военные системы управления, связи и навигации»

Адрес места работы:

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, ауд. Б-904

НИТУ «МИСИС», кафедра «Инженерной кибернетики»

Тел.: +7 499 236-25-35; e-mail: r.sadekov@misis.ru